

# **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР В ЗОНАХ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ 10Г2ФБЮ**

*П.О. КАШИРО<sup>1</sup>, А.И., ГОРДИЕНКО<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [pok6@tpu.ru](mailto:pok6@tpu.ru)

В работе исследована трубная низкоуглеродистая сталь 10Г2ФБЮ, поставленная в виде горячекатаного листа и имеющая следующий химический состав, мас. %: 0,13 С; 1,6 Мн; 0,4 Si; 0,3 Cu 0,05; 0,04 Nb; 0,05 Ti; 0,029 Al; 0,013 Р; 0,01 S. Пластины для сварки вырезали из горячекатаного листа перпендикулярно направлению прокатки. Изучены сварные швы следующих исходных состояний: в горячекатаном состоянии; после отжига при температурах 550 °С и 600 °С; после поперечно-винтовой прокатки при температуре 920 °С.

После применения лазерной сварки стали в горячекатаном состоянии получен тонкий сварной шов, рисунок 1 а, шириной  $\approx 2100$  мкм. В зоне сварного соединения выделяются ЗС, шириной  $\approx 1150-1200$  мкм, и ЗТВ, расположенные слева и справа от ЗС, рисунок 1 а. Основной структурно-фазовой составляющей ЗС является мартенсит.

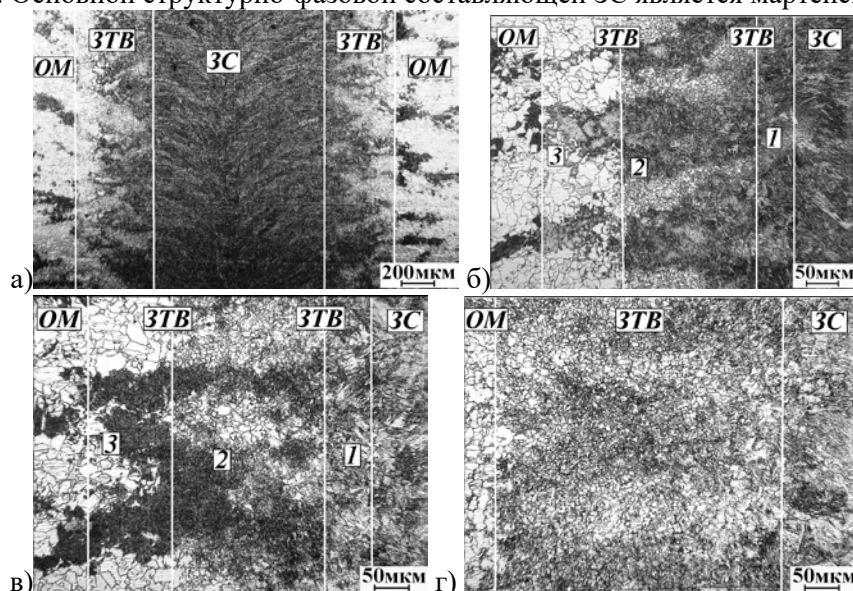


Рисунок 1 - Микроструктура сварного шва стали 10Г2ФБЮ: а,б - после горячекатанной прокатки; в – после отжига при 550 °С; г – после отжига при 600 °С

Структура исходного состояния стали полосчатая ферритно-перлитная со средним размером ферритных зерен 7 мкм. В ЗТВ выделены три зоны. Первая и вторая зоны (рисунок 1, б, зона 1 и 2), прилегающие к ЗС, имеют переходную структуру бейнитно - мартенситного типа и отличаются размерами зерен. В первой зоне, в отличие от ЗС, структура иглы либо полностью отсутствует, либо ограничена границами бывших аустенитных зерен, что свидетельствует о разогреве этой области до температурного интервала существования  $\gamma$ -фазы. В зонах 2 и 3 сохраняется полосчатость структуры. Можно предположить, что температурный интервал разогрева зон 2 и 3 достигал существования двухфазной ( $\gamma + \alpha$ )-области.

После отжига при  $T=550^\circ\text{C}$  качественных изменений в ЗС не происходит, дендритная структура сохраняется, однако в мартенсите выделяются округлые частицы  $\text{Fe}_3\text{C}$ . В ЗТВ происходит распад мартенситной структуры, пластинчатая структура преобразуется в мелкодисперсный сорбит отпуска. При повышении температуры отжига до

600 °С структура в ЗС не меняется. В ЗТВ более интенсивно происходит перераспределение углерода по объему материала, границы зон 2 и 3 различить не удастся, наблюдается рекристаллизация и появление новых мелких зерен феррита (рисунок 1, г).

Применение поперечно-винтовой прокатки приводит к измельчению исходной структуры стали 10Г2ФБЮ. Исходная полосчатость структуры при данном режиме ПВП практически полностью устраняется. ЗС имеет дендритную структуру мартенсита (рисунок 2, б). После лазерной сварки в ЗТВ выделяют четыре зоны. Зона 1 имеет переходную бейнитно – мартенситную структуру. Следующая зона 2 (рисунок 2, б, зона 2) отличается от первой меньшим размером зерен. Это связано с тем, что по мере удаления от ЗС нагрев последующих областей происходит до меньших температур, по сравнению с зоной 1, поэтому аустенитные зерна не успели вырасти.

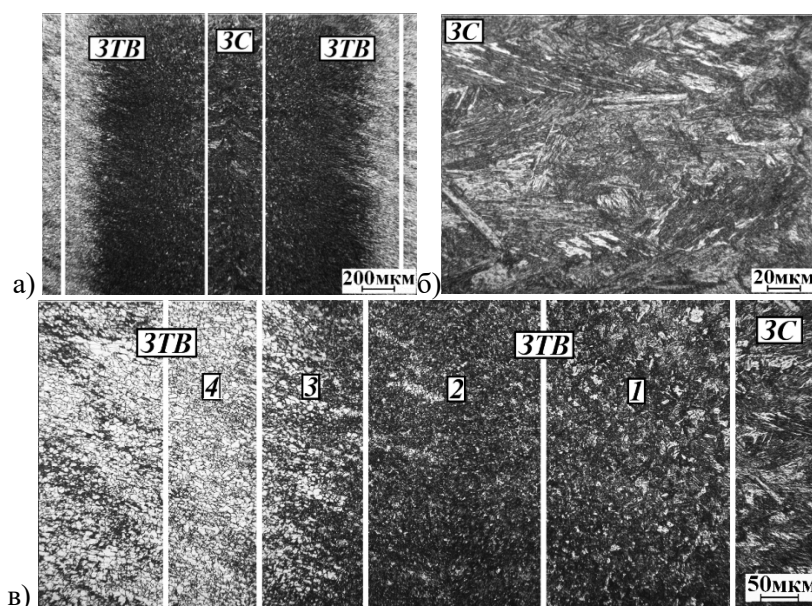


Рисунок 2 - Микроструктура сварного шва стали 10Г2ФБЮ: а – микростроение шва; б - зона сплавления; в – структуры в ЗТВ

Характер распределения микротвердости в ЗТВ стали 10Г2ФБЮ после поперечно-винтовой прокатки плавный с постепенным снижением ее значений по мере приближения к основному материалу (от 370 HV и до 185 HV).

Таблица 1 – Механические характеристики стали 10Г2ФБЮ

Структурное состояние стали Х70	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon$ , %
Горячекатаное состояние, основной металл	380	650	23.7
Горячекатаное состояние со сварным швом	390	600 ↓7%	21 ↓11%
После поперечно-винтовой прокатки, основной металл	435	760	24
После поперечно-винтовой прокатки со сварным швом	445	690 ↓9%	19 ↓20%

### Список литературы

1. Шамов Е.М. Технология и оборудование многослойной лазерной сварки неповоротных стыков труб большого диаметра для магистральных трубопроводов: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Москва, 2019 – 169 с.

2. S. Zajac, V. Schwinn and K.-H. Tacke. Characterisation and Quantification of Complex Bainitic Microstructures in High and Ultra-High Strength Linepipe Steels // Materials Science Forum Vols. 500-501 (2005) pp 387–394.
3. Грезев А., Грезев В., Сухов А., Шанчуров С., Малыш М. Разработка лазерных технологий для нефтегазовой отрасли // Станкоинструмент. – 2016. – № 2. – С. 38 – 41.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ВАКАНСИЙ НА СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

М.А.КОМЯГИН, Д.Д.МАЛИНИНА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;  
E-mail: [m-komyagin@mail.ru](mailto:m-komyagin@mail.ru)

Целью работы является исследование влияния вакансионного дефекта кристалла кремния на его электрические и термодинамические свойства. В качестве основного материала была изучена работа исследователей Пэй-Син Хуана и Чи-Мин Лу из Национального университета науки и техники Пиндуна.

Полупроводниковые материалы на основе кремния нашли широкое применение в электронике и оптоэлектронике благодаря распространенности в земной коре (27,6–29,5%), а также уникальным оптическим, электрическим, магнитным и каталитическим свойствам. В настоящее время наблюдается тенденция по уменьшению габаритов электронных компонентов. Изменение размеров приводит к изменениям свойств переноса электронов, а также к значительным изменениям оптических и механических свойств.

Микроскопические структурные дефекты могут вызывать локальные изменения и перераспределение электронной плотности, становиться причиной рассеяния носителей заряда и приводить к изменениям теплопроводности. Эти эффекты снижают механическую надежность структуры материала и эффективность электронных схем, сокращают жизненный цикл компонентов системы. В частности, более существенные эффекты возникают при образовании микроскопических дефектов в наноразмерных материалах главным образом потому, что носители в мезоскопическом диапазоне обладают упругим рассеянием, тогда как носители в макроскопическом диапазоне демонстрируют неупругое рассеяние.

Для анализа электрических и термодинамических свойств совершенных кристаллов кремния и кристаллов, содержащих вакансии, исследователями Пэй-Син Хуаном и Чи-Мин Луном был использован метод первичных плоских волн псевдопотенциала, основанный на расчетах теории функционала плотности. Выбор метода псевдопотенциала был обусловлен более простым решением уравнения Шрёдингера, поскольку искомая волновая функция разлагается по гораздо меньшему количеству базисных функций. Сущность метода заключается в замене сильного электрон-ионного потенциала более слабым, характеризующим свойства валентных электронов (рассчитываются только валентные электроны, т.к. большинство свойств системы зависят от их поведения). То есть исследуемая система  $K$  заменяется системой  $K'$ , состоящей из псевдовалентных электронов и ионов. Для проведения расчетов использовался Кембриджский программный пакет (CASTEP), с помощью которого исследовались три дефекта: точечная, тетраэдрическая и гексагональная вакансии. Результаты моделирования показали, что наличие дефектов влияет на структуру решетки и длину ковалентных связей, окружающих вакансии. Постоянная кристаллической решетки и ширина запрещенной зоны уменьшались